

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



C1-11

Comité de Estudio C1 - Desarrollo de Sistemas y Economía

BARRAS ESTATÓRICAS DAS UNIDADES GERADORAS E BUCHAS DE ALTA TENSÃO DOS TRANSFORMADORES PRINCIPAIS DE ITAIPU : ASPECTOS DE AQUISIÇÃO, ENSAIOS EM FÁBRICA E GESTÃO DE ATIVOS ATÉ SUA INSTALAÇÃO EM CAMPO

CLÁUDIO MORAIS*
Itaipu Binacional
Brasil

JAIME SUÑÉ
Itaipu Binacional
Brasil

MARCO AURÉLIO SIQUEIRA MAURO
Itaipu Binacional
Brasil

Resumo *– Tanto as barras estatóricas , quanto as buchas de alta tensão são equipamentos fundamentais dentro do processo de geração de energia elétrica e a gestão desses ativos desde a etapa de aquisição até a etapa em que serão instalados em campo faz parte das políticas e estratégias de ITAIPU visando atingir metas e índices excepcionais e de referência mundial de geração de energia elétrica, no que diz respeito a qualidade e confiabilidade.*
Este trabalho abordará o processo de aquisição realizado por ITAIPU em relação às barras estatóricas e buchas de alta tensão , relacionando sucintamente os testes que foram previstos e realizados em fábrica , tendo como base a Especificação Técnica elaborada por ITAIPU e as normas técnicas pertinentes.
Também será enfatizado, no trabalho, os controles e a gestão realizada no momento em que esses equipamentos chegam em ITAIPU , permanecem estocados (etapa de Gestão de Estoques) até a fase em que são instalados em campo.
No caso das barras estatóricas, será abordado a experiência e práticas de ITAIPU realizadas, estando as barras estocadas no almoxarifado (será dado ênfase no acondicionamento adotado das barras e verificação das condições de estanqueidade , isto é , se há vazamento do gás presente no interior da barra) , bem como os controles e verificações realizados antes de a barra ser instalada no gerador; similarmente, em relação às buchas de alta tensão, serão abordadas as recomendações aplicáveis para o seu armazenamento , as práticas e condições de estocagem , dispositivos utilizados por ITAIPU para preservar a integridade das buchas e os ensaios adotados antes de a bucha ser instalada no transformador.

Palavras clave: Aquisição de barras estatóricas e buchas de alta tensão –ensaios de recepção em fábrica – gestão de ativos

1 INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de ITAIPU possui atualmente 20 unidades geradoras de 700 MW cada , perfazendo uma capacidade instalada de 14.000 MV. Para cada unidade geradora , foram previstas 1008 barras estatóricas , as quais possuem tensão de 18 KV e uma particularidade construtiva que é a existência de condutores ôcos de cobre em seu interior, utilizados para a circulação de água desmineralizada e de baixa

* Usina Hidrelétrica de Itaipu – Av. Tancredo Neves, 6.731 – Foz do Iguaçu – PR – Brasil - cmorais@itaipu.gov.br

condutividade , necessários ao resfriamento do enrolamento estatórico. Esta característica diferencia o gerador de ITAIPU da maioria das usinas hidrelétricas existentes no mundo nesse quesito.
A cada unidade geradora está associado um banco trifásico de 3 transformadores elevadores monofásicos (18 kV/525 kV ; 60 Hz : 768 MVA –50 Hz : 825 MVA).
Atualmente, a maioria das buchas aplicadas nesses transformadores são do tipo RIP (*Resine impregnated paper*), as quais foram especificadas e testadas quanto a suportabilidade a transitórios muito rápidos (VFT – *Very Fast Transient).*

2 GENERALIDADES

2.1 – Barras Estatóricas

O enrolamento estatórico dos geradores de Itaipu é do tipo Umbrella Modificado [1] (IEC 34-7, tipo IM8221). No interior do enrolamento circula agua purificada (água desmineralizada, com baixa condutividade, isto é, da ordem de 2,1 μS/cm, com ph sendo mantido entre 8,0 e 8,5 e temperatura em torno de 41◦ C , estando o gerador em condições normais de operação). A isolação principal da barra estatórica consiste na aplicação de diversas camadas de fita isolante a base de mica, em torno da barra prensada; após esse processo, a barra é impregnada em uma autoclave e, na seqüência, colocada em um forno, a fim de obter a cura da resina.
A função das barras estatóricas é produzir as forças eletromizes –FEMs , quando submetidas à um fluxo magnético. Ao circular corrente elétrica pelas barras estatóricas, ocorre o desenvolvimento de perdas do tipo Joule, responsáveis pela geração de calor. Para minimizar os efeitos térmicos da passagem da corrente elétrica pelas barras estatóricas, foi previsto a circulação de água purificada .
Cada barra estatórica é composta de 30 condutores de cobre eletrolítico, sendo 24 condutores maciços e 6 condutores ôcos (ver Fig. 1) , com transposição tipo Roebel 360 ◦ C (sistema que distribui uniformemente a corrente elétrica por toda a seção da barra, aproveitando melhor o fluxo magnético e evitando perdas).

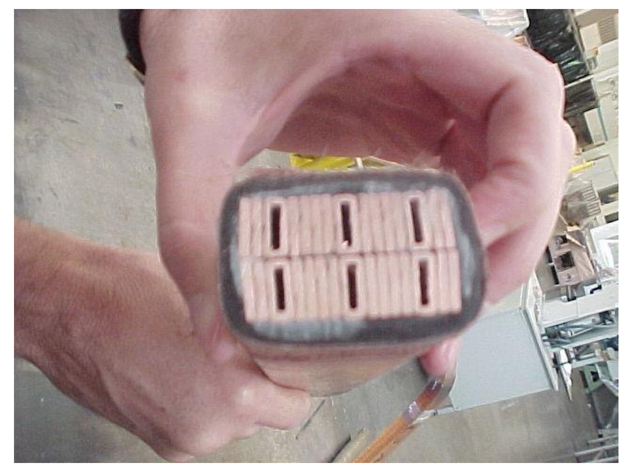

Fig. 1 – Corte transversal da barra estatórica


Fig. 2-Detalhe dos condutores ôcos da cámara de água

O resfriamento da barra ocorre quando a água passa através dos 6 condutores ôcos de cobre. Em cada extremidade dos termináis elétricos convencionais, existem as conexões hidráulicas (câmaras de água, ver Fig. 2). Estas são interligadas em uma tubulação de aço inoxidável, através da qual circula a água de resfriamento em regime fechado, através de duas motobombas previstas no sistema de Água Pura. A interligação entre a tubulação de aço inoxidável com o terminal elétrico é feita através de mangueira de teflón.

2.1 – Buchas de Alta tensão

Em Itaipu , foi prevista uma subestação isolada a gás SF_6, na elevação 128,20 m da Casa-de-força, através da qual é transmitida a energia produzida pelas unidades geradoras. O acoplamento elétrico e mecânico entre os

transformadores principais (TU´s) e a subestação isolada a gás SF_6 é realizado através de buchas de alta tensão 525 kV.
Para a aquisição das buchas de alta tensão, as especificações técnicas de Itaipu estabelecem que as mesmas devem suportar, dentre outras exigências dielétricas, as solicitações advindas de transitórios como VFT – *Very Fast Transient.*

Características gerais das buchas RIP utilizadas por Itaipu:

- Corrente nominal : 1.600 A
- Tensão nominal : 550 kV
- Tensão aplicada : 740 kV, 72 s
- Descargas parciais : max. 5 pC
- Norma de fabricação : IEC 60137 [2]

3 ENSAIOS DE RECEPÇÃO EM FÁBRICA DE BARRAS ESTATÓRICAS E BUCHAS DE ALTA TENSÃO

Gerar energia elétrica com qualidade e confiabilidade depende de vários fatores, dentre os quais destacam-se a especificação, projeto, fiscalização da fabricação e, por último, as ações de manutenção e operação do equipamento.
De fato, um equipamento inspecionado em fábrica dentro de rigorosos critérios de aceitação/recebimento resulta em:

- Maior disponibilidade de energia , pois o equipamento uma vez submetido ao crivo da Inspeção de ITAIPU, poderá cumprir sua função para a qual foi concebida, evitando futuras falhas ;

- Maior vida útil do equipamento, pois o equipamento inspecionado é liberado conforme seus requisitos de projeto ;

- Cumprimento ao cronograma de montagem do empreendimento, pois o equipamento é liberado na fábrica conforme suas especificações técnicas, evitando defeitos e falhas que poderiam ocorrer após o equipamento ser recebido na obra e ser colocado em operação.

É importante , na etapa de fiscalização em fábrica , as definições dos controles e verificações a serem realizados , os quais devem ser acordados entre cliente e fornecedor; os ensaios de tipo, ensaios de rotina e ensaios especiais devem ser adequadamente planejados, a fim de que , uma vez instalado no campo, o equipamento cumpra sua função que dele se espera, sem qualquer contratempo.

3.1 Barras estatóricas

Os seguintes controles e verificações gerais , dentre outros , foram considerados por Itaipu nas aquisições de barras estatóricas , tanto nas máquinas “ antigas” (18 primeiras unidades, adquiridas no início do Empreendimento Itaipu, a partir do início da década de 80), quanto nas unidades geradoras 9 A, 50 Hz e 18 A, 60 Hz; estas duas unidades instaladas por último , as quais foram adquiridas no ínicio da década de 2000.
ITAIPU sempre considerou para essas aquisições, a fiscalização da fabricação em 100% do lote fornecido.

3.1.1 – Curto-circuito entre condutores

Deve ser assegurado na etapa de prensagem das barras, que todos os 30 condutores isolados da barra (24 maciços e 6 condutores ôcos), estejam isolados entre si. O curto-circuito entre condutores deve ser evitado, a fim de impedir o desenvolvimento de FEMs que poderiam prejudicar o funcionamento da barra.

3.1.2 – Ensaio de tangente delta

Este ensaio tem como objetivo determinar a condição da isolação da barra após sua impregnação, segundo recomendações da norma IEEE 286/1975 [3]   e VDE 530 [4].

3.1.3 – Teste de Vida (Voltage Endurance Test)

Este ensaio é baseado nos procedimentos previstos na norma IEEE Std. 1043 [5] . A barra é colocada em uma estufa de aquecimento, sob uma tensão de 36 kV por um período mínimo de 250 hs., ou até que ocorra perfuração ; a temperatura é mantida em 100 ◦ C. Após este ciclo, as barras ensaiadas são dissecadas, a fim de avaliar as condições em relação à danos na resina de impregnação.

3.1.4 – Ensaio de ruptura da isolação

Este ensaio tem o objetivo de avaliar a rigidez dielétrica da isolação principal das barras. A parte reta da barra deve ser envolvida por fios condutores de cobre, que serão utilizados para o aterramento durante o ensaio. A barra é submergida em um tanque com óleo isolante (com rigidez dielétrica maior que 50 kV), e apoiada sobre suportes isolantes. A tensão é elevada inicialmente até 37 kV, 60 Hz, com velocidade de subida de 1 kV/s, permanecendo nesta tensão por 10 s. Em seguida, a tensão é elevada até 100 kV. Por ser um ensaio de tipo, de um lote de 1008 barras adquirido, 5 delas foram escolhidas para serem submetidas a este ensaio.

3.1.5 – Ensaio de dissecação

Este ensaio é realizado naquelas barras submetidas ao teste de vida (*Voltage endurance test*) e ao ensaio de ruptura da isolação; e tem como objetivo de verificar as condições da isolação principal, com respeito a delaminações, espaços ôcos e vazios, deformações e aderência do cobre à barra (ver Fig.3).

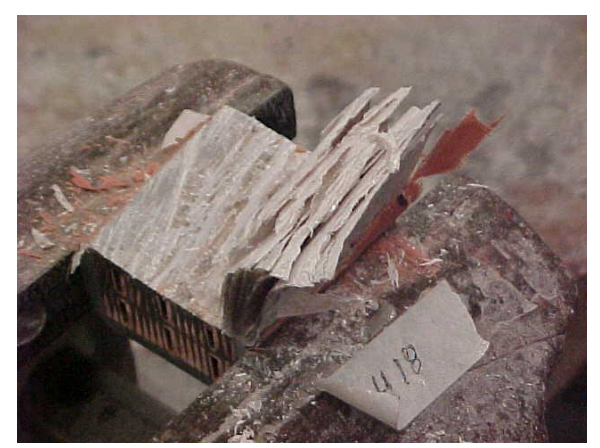


Fig. 3 – Detalhe da barra estatórica submetida a exame por dissecação



Fig. 4 – Ensaio de vazão na barra estatórica

3.1.6 – Ensaios hidráulicos nas barras estatóricas

Os ensaios hidráulicos são realizados nas barras antes e após a isolação das mesmas. Antes de as barras serem isoladas, são submetidas aos seguintes ensaios : ensaio de vazão (ver Fig. 4) , ensaio diferencial de pressão, ensaio de termochoque, ensaio de estanqueidade com gás hélio por fora das barras e ensaio de estanqueidade com pressão de gás hélio por dentro das barras.

3.2 – Buchas de alta tensão

As buchas são montadas entre o lado de alta do transformador principal (525 kV) e a subestação isolada a gás ; desta forma, os requisitos dielétricos previstos para as buchas devem ser no mínimo iguais àqueles especificados para o transformador.

Para a especificação , projeto e testes em fábrica de buchas de alta tensão do tipo RIP –*Resine impregnated paper* , ITAIPU adota a norma IEC 60.137 [2] . De modo geral, pelo menos os seguintes controles e verificações são previstos durante os ensaios de recepção em fábrica de buchas de alta tensão aplicáveis nos transformadores principais de Itaipu:

3.1.1 - Teste de tensão suportável à frequência industrial : 740 kVca, 50 Hz, durante 72s.

3.1.2 – Medição da intensidade de descargas parciais, conforme ítem 9.1 da norma IEC 60.137 [2]. A especificação de Itaipu estabelece limite de 5 pC.

3.1.3 – Teste de impulso atmosférico

Para este ensaio, a fim de possibilitar a comparação dos registros oscilográficos, na especificação de Itaipu está previsto o registro da onda de corrente e de tensão.

Como um dos critérios de avaliação , utiliza-se a comparação entre os registros das ondas, tanto para registros de tensão como corrente.

3.1.4 – Medição do fator de dissipação ($\tan\delta$) e capacitância antes e após os testes dielétricos.
Critérios de aceitação : $\Delta \tan\delta < 0,01$ % e $\Delta C_1 < 0,5$ %

3.1.5 – Teste de suportabilidade aos transientes tipo VFT (*Very fast transient*)

Os ensaios especificados pela Itaipu na validação de projetos de novas buchas (ensaio de tipo) e aceitação de buchas para fornecimento (ensaio de rotina em fábrica) incluem a realização de impulsos cortados no gás SF6.
A realização destes ensaios exigem que a extremidade superior da bucha esteja envolta com gás SF6 e neste ambiente seja realizado o corte corte no gás SF_6 (trigger).
Também nestes ensaios é exigido o registro das ondas de tensão e corrente.
A onda adotada nestes ensaios apresenta um tempo de frente de 1,5 µs, tempo de cauda : 50 µs. O tempo de corte da onda deve ser feito entre 2 e 10 µs.
A sequência de ensaios adotada diverge entre projetos e deve ser acordada com o fornecedor durante a etapa de “workstatment”.

3.1.6 – Verificação no tape :

- Tensão aplicada de 2 kV no tape de teste : 50 s,72 s;
- Tensão aplicada no tape de tensão : 20 kV, 50 Hz, 72 s;
- Medição da capacitância e fator de potência nos patamares : 5, 10,15, 20, 15, 10, 5 kV

3.1.7 - Teste de estanqueidade :

- Teste de pressão externa , conforme ítem 9.4 da IEC 1639 [6];
- Teste de estanqueidade , conforme ítens 9.8 (lado SF_6 da bucha sob uma pressão de 470 kPa, duração ≥ 2 hs ; e 9.9 (lado do óleo/transformador , com gás Hélio ; 1,5 bar medição , com duração ≥ 15 min.) da IEC 60.137 [2].

4 GESTÃO DE ATIVOS

A etapa compreendida no momento em que o equipamento é recebido em ITAIPU e permanece estocado até sua utilização em campo é planejada e executada por ITAIPU, com o objetivo de preservar as condições de uso do equipamento em caso de demanda da área de manutenção.
Após serem liberados em fábrica , as barras estatóricas e buchas de alta tensão, devem manter suas propriedades dielétricas, perfeitas condições de uso e não devem sofrer influências no meio de transporte desde sua origen até o almoxarifado de ITAIPU.
As embalagens para o transporte, assim como a forma de armazenar esses equipamentos até sua utilização final deve ser corretamente planejado.

4.1 – Barras estatóricas

Conforme procedimento interno adotado por ITAIPU [7] e [8], a embalagem considerada para esta aplicação foi desenvolvida de modo a permitir uma perfeita acomodação e fixação das barras em seu interior, protegendo a isolação contra esmagamentos e escoriações.
A caixa da embalagem foi dimensionada de modo a suportar à solicitações mecânicas normais decorrentes de seu manuseio, transporte e armazenagem. As caixas são providas de janelas para ventilação, para permitir a circulação de ar internamente, impedindo o acúmulo de umidade.
Como proteção anti-corrosiva , as barras são preenchidas com nitrogêncio e tem seus terminais vedados com tampas de alumínio, que só devem ser retiradas para montagem ou procedimentos de manutenção.
Em relação ao recinto para abrigar as caixas de barras estatóricas, este deve ser coberto, livre de goteiras , livre de roedores e cupins. Tais requisitos são cumpridos por ITAIPU.

4.1.1 - Manutenção das barras estatóricas no almoxarifado

As barras estatóricas recebidas no almoxarifado de Itaipu vem preenchidas, desde fábrica, com gás inerte N2 ,conforme preceito interno [7] e [8]. A manutençao anual exercida por ITAIPU prevê a inspeção visual das conexões hidráulicas , quanto à deformação e presença de oxidações. Nenhum tipo de lubrificante é permitido utilizar nas conexões hidráulicas, pois este poderá contaminar a barra. Para a limpeza das conexões hidráulicas, somente escova e pano de limpeza é permitido.
Um dispositivo distribuidor de nitrogênio N2 é utilizado para fazer a remoção interna de pó ou outros corpos estranhos eventualmente depositados no interior da barra.
Uma pressão de 2 kgf/cm^2 é ajustada, durante 30 s, com a finalidade de expulsar prováveis impurezas que se encontrarem no interior das barras.O tempo máximo admitido entre a abertura do tampão e enchimento com nitrogênio é de 8 horas.

4.1.2 - Ensaios realizados nas barras antes de sua utilização no campo : ITAIPU adota os seguintes testes e verificações antes de a barra ser montada no gerador :

- Inspeção visual;
- Teste de tangente delta;
- Teste de tensão aplicada (com valor reduzido em relação aos valores submetidos em fábrica : $V_{aplicada} = 0,8\ V_{fábrica}$) ;
- Teste de descargas parciais.

Encontra-se em fase de desenvolvimento em ITAIPU, para aplicação futura, o uso de container climatizado, cujos seguintes requisitos técnicos foram especificados : temperatura interna do container : 24 a 30 °C; umidade do ambiente interno do container : 40% ± 5%. (ver Fig. 5).

4.2 – Buchas de alta tensão

Após ensaios de recebimento, medição da capacitância e tg delta com 10kV e inspeção visual e atendendo as orientações dos fornecedores as buchas são acondicionadas em dispositivo que mantém as buchas na posição vertical (mesma posição em que é instalada em campo, ver Fig. 6) , sendo o lados inferior da bucha (conexão com o transformador) e lado superior (conexão com a subestação SF_6) pressurizados com N2 a pressão de 0,3 kgf/cm^2, evitando assim a deformação mecânica do condutor ou corpo condensivo e a exposição do corpo condensivo a umidade. Este cuidado é necessário devido as buchas de aplicação óleo/SF_6 não possuírem proteção externa ao corpo condensivo, seja de porcelana ou polimérica.



Fig.5 – Containers para estocagem de barras



Fig. 6 – Dispositivo para estocagem de buchas

4.2.1 - Controles realizados no almoxarifado

Rotineiramente são realizadas inspeções quanto a ausência de vazamentos nos conjuntos pressurizados. Processo de supervisão remota encontra-se em fase de projeto.

4.2.2 - Controle realizados antes de a bucha ser instalada no transformador

Antes da instalação da bucha nos transformadores elevadores o equipamento passa por inspeção visual e medição de capacitância e tg delta em 10kV.

5 CONCLUSÕES

As barras estatóricas e buchas de alta tensão são equipamentos elétricos de fundamental importância dentro do contexto de geração de energia elétrica de Itaipu. Desta forma, adquirir esses equipamentos dentro de rigorosos critérios de aceitação deve ser sempre exercido e praticado por ITAIPU.

Assegurar que esses equipamentos tenham qualidade e confiabilidade durante todo o seu ciclo de vida é de fundamental importância para ITAIPU atingir seus objetivos estratégicos relacionados a geração de energia elétrica.

A etapa de fiscalização em fábrica, na qual os equipamentos devem ser liberados em conformidade com os requisitos técnicos que foram especificados , assim como a etapa na qual esses ativos permanecem estocados até sua instalação definitiva em campo, são eventos que participam diretamente do sucesso operacional de ITAIPU.

As práticas de ITAIPU direcionadas para a Gestão dos Ativos , tanto desenvolvidas no ambiente fabril, como no almoxarifado, tem contribuído, dentre outros fatores, para que ITAIPU tenha uma das menores taxas de falhas entre as usinas do mundo e tenha eficiência em seu processo de geração de energia , sendo atualmente responsável por cerca de 17% da energia fornecida ao Brasil e 75% ao Paraguai .

6 REFERÊNCIAS

[1] ITAIPU HYDROELECTRIC POWER PLANT. Technical Specification.7028-20-15200-I-R0.

[2] IEC 60137 – Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, 2003.

[3] IEEE 286 – 2000 Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation - New York, 2000.

[4] DEUTSCHE NORM DIN - VDE 530 – Umlaufende elektrische Maschinen – Berlim – 1991.

[5] IEEE Std. 1043 - Recommended practice for voltage-endurance testing of form-wound bars and coils. IEEE, New York, 1989.

[6] IEC 1639 – Direct connection between power transformers and gas – insulated metal – enclosed switchgear for rated voltages of 72,5 kV and above.

[7] 1970-IM-19590-P-R0 – Armazenagem e manutenção das barras estatóricas no almoxarifado.

[8] 6210-20-71136-P-R0 - Instrução de armazenagem para barras do enrolamento do estator.